

Научная статья

УДК 574.58

DOI: 10.31857/S0869769824060029

EDN: HTBZYA

## Низкочастотный акустический отклик растений на абиотический стресс

Ю. Н. Кульчин, Г. А. Шабанов, А. А. Рыбченко, С. О. Кожанов✉,  
Е. П. Субботин

*Юрий Николаевич Кульчин*

академик РАН, доктор физико-математических наук

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

kulchin@iacp.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

*Геннадий Анатольевич Шабанов*

кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

НИЦ «Арктика» ДВО РАН, Магадан, Россия

neurokib@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7349-5724>

*Александр Алексеевич Рыбченко*

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

НИЦ «Арктика» ДВО РАН, Магадан, Россия

neurokib@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4688-1491>

*Сергей Олегович Кожанов*

младший научный сотрудник

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

kozhanov\_57@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

*Евгений Петрович Субботин*

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

s.e.p@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

**Аннотация.** В работе исследуются акустические микровибрации в диапазоне от 0,1 до 27 Гц, возникающие в листьях и корневой системе растения розы китайской *Hibiscus rosa-sinensis* L. в ответ на облучение светом. Показано, что при облучении растения светом в листе возникают микровибрации с частотой 5,77198 Гц. При воздействии света были также зарегистрированы микровибрации в корневой системе с частотами 23,61 и 16,35 Гц. Похожий эффект наблюдали при повреждении листьев от нанесения на них раздражающей мази «Линкас». Нанесение на четыре разных листа растения мази «Линкас» приводило также к появлению характерных микровибраций в корневой системе, при этом каждому из листьев соответствовала своя частота колебаний. По-видимому, в корневике поступает

информация о каждом листе. Таким образом, с помощью микровибраций растение может взаимодействовать с внешней средой.

**Ключевые слова:** микровибрации, корневая система, звуковые колебания, листья растений

**Для цитирования:** Кульчин Ю.Н., Шабанов Г.А., Рыбченко А.А., Кожанов С.О., Субботин Е.П. Низкочастотный акустический отклик растений на абиотический стресс // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 6. С. 18–27. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060029>

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема N FFW-2024-0004).

Original article

## Plants low-frequency acoustic response to abiotic stress

Yu. N. Kulchin, G. A. Shabanov, A. A. Rybchenko, S. O. Kozhanov, E. P. Subbotin

*Yuriy N. Kulchin*

Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics  
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[kulchin@iacp.dvo.ru](mailto:kulchin@iacp.dvo.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

*Gennadiy A. Shabanov*

Candidate of Sciences in Biology, Associate Professor, Leading Researcher  
«Arctica» Scientific and Research Center, FEB RAS, Magadan, Russia  
[neurokib@mail.ru](mailto:neurokib@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-7349-5724>

*Aleksandr A. Rybchenko*

Doctor of Sciences in Technique, Professor, Chief Researcher  
«Arctica» Scientific and Research Center, FEB RAS, Magadan, Russia  
[neurokib@mail.ru](mailto:neurokib@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4688-1491>

*Sergey O. Kozhanov*

Junior Researcher  
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[kozhanov\\_57@mail.ru](mailto:kozhanov_57@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

*Evgeniy P. Subbotin*

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher  
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[s.e.p@list.ru](mailto:s.e.p@list.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

**Abstract.** In the paper acoustic microvibrations in the range from 0.1 to 27 Hz that occur in the leaves and root system of the Chinese rose plant in response to light irradiation, as well as damage to the leaves in the form of applying the irritating ointment “Linkus” to them. It has been shown that when a plant is irradiated with light, microvibrations arise in the leaf with a frequency of 5.77198 Hz, which presumably can be associated with the process of photosynthesis. When exposed to light, microvibrations were also recorded in the root system with frequencies of 23.61 and 16.35 Hz. Applying irritating ointment “Linkus” to four spatially spaced rose leaves

also led to the appearance of characteristic microvibrations in the root system, with each leaf corresponding to its own vibration frequency, which apparently indicates that the rhizome receives information about each leaf and thus, using low-frequency microvibrations, the plant can interact with the external environment.

**Keywords:** microvibrations, root system, acoustics, plant leaves

**For citation:** Kulchin Yu.N., Shabanov G.A., Rybchenko A.A., Kozhanov S.O., Subbotin E.P. Plants low-frequency acoustic response to abiotic stress. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(6):18–27. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060029>

**Funding.** The research was carried out within the state assignment of IACP FEB RAS (Theme FFWF-2024-0004).

## Введение

На сегодняшний день тот факт, что растения в процессах своей жизнедеятельности используют звуковые сигналы, не является таким же очевидным, как, например, использование ими световых, температурных и прочих сигналов [1]. У них нет ярко выраженных органов восприятия акустических колебаний, в результате чего считается, что важность их не велика. Тем не менее существует большое число работ, в которых говорится о значительном влиянии звука на рост и развитие растений. Например, известно, что растения арабидопсиса (*Arabidopsis thaliana*) реагируют на вибрации, генерируемые травоядными животными [2]. «Услышав» звук жевания листьев гусеницей *Pieris rapae*, растения производят более высокие уровни антоцианов и глюкозинолатов [2]. В результате же предварительного воздействия на листья арабидопсиса такого звука (жевания листьев гусеницей *Pieris rapae*) в них отмечается повышенное содержание данных веществ [2]. При изучении растений табака *Nicotiana tabacum* были получены аналогичные результаты. После обработки звуком жевания гусеницы *Phthorimaea operculella* в листьях табака концентрация никотина была повышена и аналогична уровням при непосредственном заражении [3].

Помимо реакции на жевание листьев гусеницами и животными также известно о восприятии растениями звуков жужжания опылителей. Они способны различать звук от разных пчел, характеристики жужжания которых различаются по частоте и интенсивности, в результате чего растения контролируют выделение пыльцы, отталкиваясь от того, является насекомое настоящим опылителем или нет [4]. В работе [5] было показано, что при воздействии звука летящей пчелы или же синтетических звуковых сигналов на аналогичных частотах цветы пляжной примулы *Oenothera Drummondii* вырабатывают нектар со значительно повышенной концентрацией сахара, по сравнению с необлученными цветками, таким образом способствуя увеличению вероятности перекрестного опыления. Известно также, что растения *Nepenthes hemsleyana* способны отражать ультразвуковые сигналы летучих мышей, что привлекает последних, те ночуют в его листьях, а их помет увеличивает потребление растениями азота [6].

Помимо биотических звуков растения реагируют также и на абиотические звуковые колебания, например на звуки воды. В частности, было показано, что корни арабидопсиса растут в сторону сигнала 200 Гц, который считается звуком проточной воды [7]. В работе [8] корни кукурузы также росли в направлении источника звука частотой 220 Гц. Аналогичный эффект наблюдался в [9] с корнями *Pisum sativum*. Предполагается, что растения могут воспринимать и звук грома и таким образом готовиться к выпадению предстоящих осадков, например закрывая цветки во избежание повреждения цветочных структур и пыльцы [10]. Определенные звуки могут также мешать нормальному развитию растений. К примеру, шум от промышленной деятельности и дорог может затруднять восприятие звука воды [9]. В работе [11] авторы показали, что воздействие шума дорожного движения длительностью 16 ч на протяжении 15 дней на растения *Tagetes patula* и *Salvia splendens* оказало значительное влияние на их рост, накопление  $H_2O_2$ , антиоксидантных ферментов и фитогормонов.

Воспринимать звуки способны и растения, обитающие под водой. В ряде работ, где изучались различные водоросли, показано, что их рост значительно улучшался при воз-

действии одночастотного звука. В [12] улучшенный рост микроводорослей *C. pyrenoidosa* наблюдался при воздействии звуковых волн частотой 0,4 кГц. В [13] авторы показали, что использование звуковой обработки с частотой 2,2 кГц приводит к увеличению биомассы микроводорослей *Picochromum oklahomensis* на 27,5%. В другом эксперименте отмечается стимулирующее действие звука целого набора частот. Результаты свидетельствовали, что микроводоросли *H. pluvialis* при обработке музыкой увеличивали темпы роста на 58% по сравнению с микроводорослями, развивавшимися без обработки [14].

Эффект стимуляции роста при воздействии звуковых колебаний встречается также и у наземных растений [15]. Обработка звуковыми волнами частотой 0,1–1 кГц привела к повышению урожайности сладкого перца, огурцов и помидоров на 30,1, 37,1 и 13,2% соответственно [15]. Урожайность салата, шпината, хлопка, риса и пшеницы увеличилась на 19,6, 22,7, 11,4, 5,7 и 17,0% соответственно. В [16] сообщается о положительном влиянии звуковой обработки на рост клубники, ее цветение и плодоношение, цвет листьев, а также на устойчивость ее к болезням и насекомым-вредителям. В [17] отмечается, что воздействие на растения арабидопсиса звука с частотой 1000 Гц способствует лучшей устойчивости к инфекции, вызванной некротрофным грибом *Botrytis cinerea*, а в [18] говорится об иммунной активации арабидопсиса против корневого патогена *Ralstonia solanacearum* вследствие воздействия звуковых колебаний с частотой 10 кГц.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что растения способны использовать звуковые колебания в процессах своей жизнедеятельности. В таком случае они вполне могли бы и сами издавать определенные звуковые сигналы и «общаться» между собой. В работе [19] авторы показали, что присутствие соседнего растения оказывает существенное влияние на прорастание семян перца, даже при условии, что все известные источники коммуникационных сигналов заблокированы. Авторы сделали вывод о существовании новых неизученных каналов связи между растениями. Одним из таких способов, хотя он и не является произвольным, может быть процесс кавитации. В недавнем исследовании авторы зафиксировали ультразвуковые колебания, издаваемые растениями табака и помидоров в ответ на стресс вследствие повреждения и недостатка воды [20]. При этом на разный раздражитель растения отвечали звуками, различающимися по своим характеристикам. Было сделано предположение, что другие виды растений, живущие поблизости, могут различать разные звуки, чтобы соответствующим образом подстраиваться и реагировать.

Как растения воспринимают звуковые сигналы, остается неясным. Наиболее вероятными кандидатами на роль сенсоров звуков являются ионные механочувствительные каналы, представляющие собой трансмембранные белки, которые облегчают поток ионов при механической стимуляции. Также воспринимать изменения во внеклеточном матриксе, вызванные звуковыми вибрациями, могут белки-рецепторы [21].

В представленных выше работах исследовалась чувствительность растений к частотам выше 200 Гц, в то время как об эффектах, связанных с вибрациями на более низких частотах, не сообщалось. Целью данной работы было исследовать акустический отклик растения розы в диапазоне волн 0,1–27 Гц в ответ на облучение его светом и повреждение листьев.

## Материалы и методы

Для изучения звукового отклика растений на внешние воздействия было выбрано растение роза китайская (*Rosa chinensis*) (рис. 1), имеющее листья достаточно крупного размера, что важно для плотного контакта с датчиками. Растение выращивалось в цветочном горшке в почве при дневном солнечном освещении и комнатной температуре, полив осуществлялся 2 раза в неделю.

Работа состояла из двух этапов. На первом исследовалась вибрационная реакция листьев розы на воздействие света, в том числе ответ со стороны корневой системы розы на включение света; на втором – раздражение, вызываемое нанесением мази «Линкас» на его листья.



Рис. 1. Китайская роза



Рис. 2. Пьезокерамические датчики, используемые в исследовании

Для регистрации акустических вибраций использовались пьезокерамические датчики (рис. 2), залитые в силиконовую оболочку, диаметром 60 мм, весом 95 г. Диапазон частот микровибраций, регистрируемых датчиками, 0,1–27,0 Гц. Датчики были адаптированы (химически нейтральны по материалам и электрически защищены) для работы с биологическими объектами. Металлический промышленный аналог такого датчика для технических целей – низкочастотный пьезокерамический акселерометр СА-YD-109.

Регистрация спектра микровибраций происходила в затемненной удаленной от посторонних шумов комнате по стандартной методике, разработанной для спектрального анализатора акустоэнцефалограммы человека РС-АЭГ-01 [22, 23]. Зарегистрированный датчиками электрический сигнал механических микровибраций листа подвергался спектральному анализу в частотном диапазоне от 0,1 до 27 Гц. В результате на выходе анализатора спектра получали 8400 спектральных гармоник. Для выделения длительно текущих ритмических процессов было выбрано оптимальное время интегрирования 160 с, что составляло 1 кадр анализируемого спектрального массива информации. Точность определения спектральных гармоник до пятого знака после запятой обеспечивал рубидиевый стандарт частоты Ч1-1013. Большое время интегрирования позволяло уменьшить влияние паразитных спектральных гармоник и повысить точность, надежность и воспроизводимость результатов исследований.

## Эксперимент с листьями

Лист розы помещался на столик и прижимался первым датчиком. Второй датчик располагался рядом на столике для измерения фоновых вибраций. При этом датчики имели одинаковые усилители и были условно помечены как левый канал (L) и правый канал (R).

Одно измерение состояло из 3 кадров по 160 с последовательной непрерывной записи микровибраций. Сначала проводились контрольные измерения при выключенном свете. Перед этим в данных условиях растение розы находилось не менее 30 мин. Далее после 3 кадров записи включался свет. Через 15 мин после этого проводились аналогичные измерения уже с включенным светом. Источником освещения была фитолампа типа «Фотосинтез-54» мощностью 18 Вт, со светоотдачей 1080 лм и с пиковыми длинами волн в красной 630–650 нм и в синей 450–460 нм областях спектра. После этого датчики менялись местами, и весь эксперимент повторялся.

Данный эксперимент был проведен 9 раз с одним и тем же листом, но в разные дни в промежутки времени с 10 до 11 ч дня. Каждый эксперимент состоял из регистрации 3 контрольных кадров в затемненном помещении и 3 кадров после засветки фитолампой.

## Эксперимент с корнями растения

Для измерения микровибраций, создаваемых корневой системой растения розы, один датчик устанавливался на поверхности земли горшка в области корневища, а второй – на столе, на котором находилось растение. Далее проводилась запись микровибраций сначала в темноте, а затем при включенной фитолампе. Условия эксперимента соответствовали описанным выше.

В экспериментах также изучалась реакция корневой системы на абиотическое раздражение листьев посредством нанесения на их поверхность мази вида «Линкас», которая представляет собой местнораздражающее средство природного происхождения (в состав мази входят: левоментол, эвкалиптовое масло, камфора, гвоздичное масло, терпентинное масло). Нанесенная мазь выдерживалась 10 мин, после чего все ее излишки и следы убирались. Исследовались четыре листа растения, разнесенные в пространстве по четырем образующим растение крупным веткам.

## Результаты и обсуждение

**Эксперимент с листьями.** График вычитания кадров информации показан на рис. 3.

В результате вычитания контрольных кадров из кадров, полученных при освещении розы, была найдена спектральная гармоника, которая максимально отражала отклик на световой стресс, обусловленный скачкообразным изменением освещения от темноты к свету. Данная спектральная гармоника с частотой 5,77198 Гц регистрировалась после 15-минутного воздействия светом, когда фотосинтетический аппарат растения был адаптирован к световому облучению. Вероятно, данная частота акустических колебаний связана с функцией процесса фотосинтеза листьев растения. Разностная амплитуда реакции на освещение растения составила  $1,77 \pm 0,89$  усл. ед., что высоким значением не является, однако на фоне прочих акустических вибраций данный сигнал особенно выделялся.

**Эксперимент с корнями растения.** Реакция со стороны корневой системы растения розы на стрессовое воздействие света была более сильной. При этом были выделены две значительные спектральные гармоники с частотами 23,61 и 16,35 Гц с амплитудами  $233,4 \pm 67,7$  и  $139,7 \pm 86,6$  усл. ед. соответственно. Результаты измерений амплитуд акустических микровибраций для пяти кадров записи сигналов показаны на рис. 4.

Видно, что вибрационные сигналы на частотах 23,61 и 16,35 Гц стабильно сохраняются в результате многократных повторений измерений.

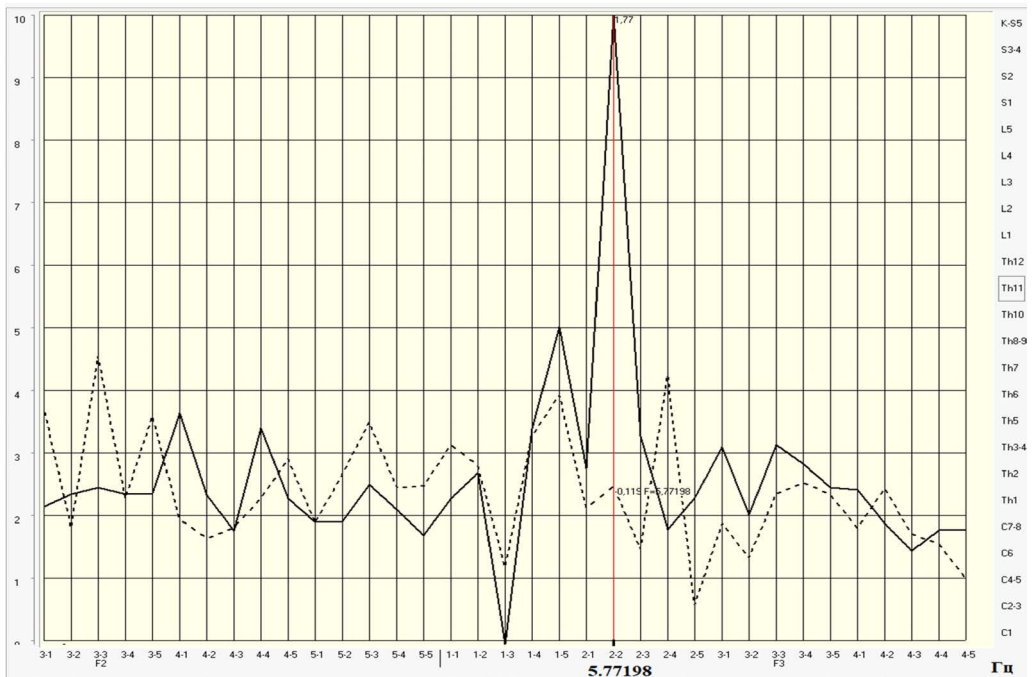


Рис. 3. График вычитания кадров информации, снятых после освещения розы фитолампой, и кадров, снятых с розы, находящейся в полутьме. Пунктирная линия – показания датчика на листе, сплошная – датчика на столе без листа (вибрация стола)

При исследовании реакции системы корней растения розы на нанесение на ее листья раздражающей мази «Линкас» были зарегистрированы характерные частоты микровибраций для каждого из четырех листьев, на которые наносилась мазь:

Лист	Частота, Гц
1	16,24252
2	19,63404
3	17,94973
4	20,80154

Данные частоты сохранились и при повторном раздражении спустя 3 дня после первого воздействия. При этом остается неясным, является ли такая реакция корневой системы ответом на механическое воздействие или же это результат биохимического взаимодействия компонентов мази и листа. Похожие результаты наблюдались в работе [20], где растения издавали звуки, когда испытывали стресс вследствие повреждений либо обезвоживания, однако данные сигналы лежали в частотной области ультразвука.

Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что на уровне корневища регистрируется информация о раздражении каждого листа в виде специфичной частоты акустических микровибраций для каждого из них. То есть корень растения как бы «видит» свой куст (дерево) как многочастотную матрицу непрерывных осцилляций и «понимает», от какого из его листьев поступает сигнал. В данном случае, принимая сигналы от листьев, с помощью корней растения могли бы передавать соседям различную информацию, например об опасности, и оперативно реагировать на нее. Это позволяет говорить о взаимодействии растения с внешней средой и соседними растениями посредством таких низкочастотных акустических вибраций.

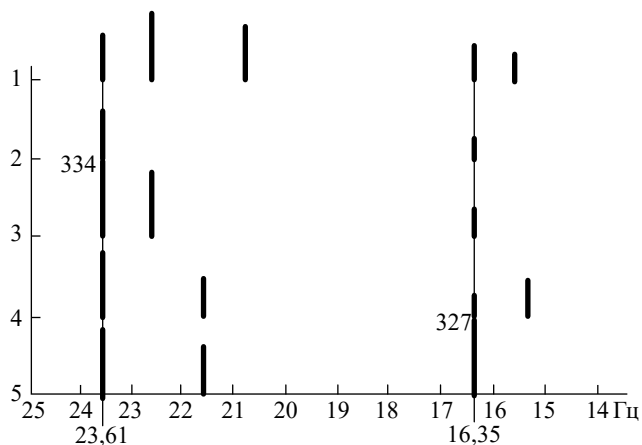


Рис. 4. Результаты измерений амплитуд микровибраций для 5 кадров записи

Механические микровибрации ультранизких частот, особенно 0,1–30 Гц, распространяются в разных средах на большие расстояния практически без затухания, минимально тратят энергию в отличие от химического и электрического сигналов, а также не требуют специализированных рецепторов у клетки. Этот механизм является хорошей основой для связи между клетками внутри растения и между растениями по корням и земле на больших площадях, вследствие чего данный диапазон частот требует детального и последовательного изучения.

## Заключение

В результате экспериментов по изучению низкочастотных акустических вибраций листьев растения розы, возникающих при действии абиотического стресса, была установлена спектральная гармоника микровибраций листа розы с частотой 5,77198 Гц, возбуждающаяся в ответ на облучение растения светом фитолампы.

Эксперименты по изучению ответа корневой системы растения розы на световой стресс показали, что при освещении растения излучением фитолампы в корнях возникают низкочастотные акустические вибрации на частотах 23,61 и 16,35 Гц.

Воздействие на растение розы раздражающей мази, нанесенной на листья, привело к появлению в спектре низкочастотных акустических вибраций спектральных гармоник, соответствующих конкретному листу. Таким образом, корневище, по всей видимости, способно воспринимать каждый лист по индивидуальной частоте его микровибраций.

Регистрируемые акустические низкочастотные вибрации могут быть проявлением одного из способов общения растений с внешней средой.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Son J.S., Jang S., Mathevon N., Ryu C.M. Is plant acoustic communication fact or fiction? // *New Phytologist*. 2024. Vol. 242, N 5. P. 1876–1880.
2. Appel H.M., Cocroft R.B. Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing // *Oecologia*. 2014. Vol. 175, N 4. P. 1257–1266.
3. Pinto C.F. et al. Chemical responses of *Nicotiana tabacum* (Solanaceae) induced by vibrational signals of a generalist herbivore // *Journal of Chemical Ecology*. 2019. Vol. 45. P. 708–714.
4. De Luca P.A., Vallejo-Marín M. What's the 'buzz' about? The ecology and evolutionary significance of buzz-pollination // *Current Opinion in Plant Biology*. 2013. T. 16, N 4. P. 429–435.



5. Veits M. et al. Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration // *Ecology Letters*. 2019. Vol. 22, N 9. P. 1483–1492.
6. Schöner M.G. et al. Bats are acoustically attracted to mutualistic carnivorous plants // *Current Biology*. 2015. Vol. 25, N 14. P. 1911–1916.
7. Rodrigo-Moreno Ana et al. Root phonotropism: early signalling events following sound perception in *Arabidopsis* roots // *Plant Science*. 2017. Vol. 264. P. 9–15.
8. Gagliano Monica, Stefano Mancuso, Daniel Robert. Towards understanding plant bioacoustics // *Trends in Plant Science*. 2012. Vol. 17, N 6. P. 323–325.
9. Gagliano Monica et al. Tuned in: plant roots use sound to locate water // *Oecologia*. 2017. Vol. 184, N 1. P. 151–160.
10. Khait Itzhak et al. Sound perception in plants // *Seminars in cell & developmental biology*. Academic Press, 2019. Vol. 92.
11. Kafash Zohreh Haghghi et al. Traffic noise induces oxidative stress and phytohormone imbalance in two urban plant species // *Basic and Applied Ecology*. 2022. Vol. 60. P. 1–12.
12. Jiang Shiren et al. Effects of sonic waves at different frequencies on propagation of *Chlorella pyrenoidosa* // *Agricultural Science and Technology*. 2012. Vol. 13, N 10. P. 2197.
13. Cai Weiming, et al. Audible sound treatment of the microalgae *Picochlorum oklahomensis* for enhancing biomass productivity // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 202. P. 226–230.
14. Christwardana M., Hadiyanto H. The effects of audible sound for enhancing the growth rate of microalgae *Haematococcus pluvialis* in vegetative stage // *HAYATI Journal of Biosciences*. 2017. Vol. 24, N 3. P. 149–155.
15. Hassanien Reda HE et al. Advances in effects of sound waves on plants // *Journal of Integrative Agriculture*. 2014. Vol. 13, N 2 P. 335–348.
16. Qi Lirong et al. Influence of sound wave stimulation on the growth of strawberry in sunlight greenhouse // *Computer and Computing Technologies in Agriculture III: Third IFIP TC 12 International Conference, CCTA 2009, Beijing, China, October 14–17, 2009, Revised Selected Papers 3*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
17. Choi B. et al. Positive regulatory role of sound vibration treatment in *Arabidopsis thaliana* against *Botrytis cinerea* infection // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, N 1. P. 2527.
18. Jung J. et al. Sound vibration-triggered epigenetic modulation induces plant root immunity against *Ralstonia solanacearum* // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. P. 1978.
19. Gagliano M. et al. Out of sight but not out of mind: alternative means of communication in plants // *PLoS One*. 2012. Vol. 7, N. 5. P. e37382.
20. Khait I. et al. Sounds emitted by plants under stress are airborne and informative // *Cell*. 2023. Vol. 186, N 7. P. 1328–1336. e10.
21. Hamant O., Haswell E.S. Life behind the wall: sensing mechanical cues in plants // *BMC Biology*. 2017. Vol. 15. P. 1–9.
22. Патент на полезную модель № 202454 Российская Федерация, МПК51 А61В 5/0476(2020.08) Регистратор спектра микровибраций головного мозга / Шабанов Г.А., Рыбченко А.А., Лебедев Ю.А., Зубков И.А.; НИЦ «Арктика» ДВО РАН (RU), заявка № 2020125873; приоритет 04.08.2020; опубл. 18.02.2021. Бюл. № 5.
23. Шабанов Г.А., Рыбченко А.А., Лебедев Ю.А., Луговая Е.А. Регистратор спектра акустического поля головного мозга человека // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2021. Т. 24, № 3. С. 28–36. DOI: 10.18127/j15604136-202103-03.

## REFERENCES

1. Son J.S., Jang S., Mathevon N., Ryu C.M. Is plant acoustic communication fact or fiction? *New Phytologist*. 2024;242(5):1876–1880.
2. Appel H.M., Cocroft R.B. Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia*. 2014;175(4):1257–1266.
3. Pinto C.F. et al. Chemical responses of *Nicotiana tabacum* (Solanaceae) induced by vibrational signals of a generalist herbivore. *Journal of Chemical Ecology*. 2019;45:708–714.
4. De Luca P.A., Vallejo-Marín M. What's the 'buzz' about? The ecology and evolutionary significance of buzz-pollination. *Current Opinion in Plant Biology*. 2013;16(4):429–435.

5. Veits M. et al. Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration. *Ecology Letters*. 2019;22(9):1483–1492.
6. Schöner M.G. et al. Bats are acoustically attracted to mutualistic carnivorous plants. *Current Biology*. 2015;25(14):1911–1916.
7. Rodrigo-Moreno Ana et al. Root phonotropism: early signalling events following sound perception in *Arabidopsis* roots. *Plant Science*. 2017;264:9–15.
8. Gagliano Monica, Stefano Mancuso, Daniel Robert. Towards understanding plant bioacoustics. *Trends in Plant Science*. 2012;17(6):323–325.
9. Gagliano Monica et al. Tuned in: plant roots use sound to locate water. *Oecologia*. 2017;184(1):151–160.
10. Khait Itzhak et al. Sound perception in plants. In: *Seminars in cell & developmental biology*. Academic Press; 2019. Vol. 92.
11. Kafash Zohreh Haghighi et al. Traffic noise induces oxidative stress and phytohormone imbalance in two urban plant species. *Basic and Applied Ecology*. 2022;60:1–12.
12. Jiang Shiren et al. Effects of sonic waves at different frequencies on propagation of *Chlorella pyrenoidosa*. *Agricultural Science & Technology*. 2012;13(10):2197.
13. Cai Weiming et al. Audible sound treatment of the microalgae *Picochlorum oklahomensis* for enhancing biomass productivity. *Bioresource Technology*. 2016;202:226–230.
14. Christwardana M., Hadiyanto H. The effects of audible sound for enhancing the growth rate of microalgae *Haematococcus pluvialis* in vegetative stage. *HAYATI Journal of Biosciences*. 2017;24(3):149–155.
15. Hassanien Reda HE et al. Advances in effects of sound waves on plants. *Journal of Integrative Agriculture*. 2014;13(2):335–348.
16. Qi Lirong et al. Influence of sound wave stimulation on the growth of strawberry in sunlight greenhouse. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture III: Third IFIP TC 12 International Conference, CCTA 2009, Beijing, China, October 14–17, 2009, Revised Selected Papers 3*. Berlin Heidelberg: Springer; 2010.
17. Choi B. et al. Positive regulatory role of sound vibration treatment in *Arabidopsis thaliana* against *Botrytis cinerea* infection. *Scientific Reports*. 2017;7(1):2527.
18. Jung J. et al. Sound vibration-triggered epigenetic modulation induces plant root immunity against *Ralstonia solanacearum*. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:1978.
19. Gagliano M. et al. Out of sight but not out of mind: alternative means of communication in plants. *PloS One*. 2012;7(5). e37382.
20. Khait I. et al. Sounds emitted by plants under stress are airborne and informative. *Cell*. 2023;186(7):1328–1336. e10.
21. Hamant O., Haswell E.S. Life behind the wall: sensing mechanical cues in plants. *BMC Biology*. 2017;15:1–9.
22. Patent na poleznuyu model' № 202454 Rossiiskaya Federatsiya, MPK51 A61V 5/0476(2020.08) Registrator spektra mikrovibratsii golovnogo mozga. Shabanov G.A., Rybchenko A.A., Lebedev Yu.A., Zubkov I.A. / NITS "Arktika" DVO RAN (RU), Zayavka № 2020125873; Prioritet 04.08.2020; opubl. 18.02.2021. Byul. N 5. (In Russ.).
23. Shabanov G.A., Rybchenko A.A., Lebedev Yu.A., Lugovaya E.A. Register of the human brain acoustic area spectrum. *Biomedicine Radioengineering*. 2021;24(3):28–36. DOI: 10.18127/j15604136-202103-03. (In Russ.).